

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

RADIÁLNÍ PÍSTOVÝ HYDROGENERÁTOR

RADIAL PISTON PUMP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KAPOUN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ROMAN KLAS, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Kapoun

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Radiální pístový hydrogenerátor

v anglickém jazyce:

Radial piston pump

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V práci budou obecně popsány jednotlivé typy hydrogenerátorů a doplněny o základní rovnice a charakteristiky. Hlavní část bakalářské práce bude následně věnována popisu konstrukce radiálního pístového hydrogenerátoru včetně modifikací a kinematiky jeho chodu.

Cíle bakalářské práce:

Student si osvojí základní poznatky z oblasti tekutinových mechanismů a získá představu o nejdůležitějších charakteristikách hydrogenerátorů. Na příkladu radiálního pístového hydrogenerátoru bude sledovat pulsace průtoku a vliv parametrů na jejich velikost a rovnoměrnost dodávky pracovní kapaliny. Následně provede zhodnocení těchto pulsací s ohledem na velikost excentricity hlavního rotoru, počet pístů a velikost pracovní komory.

Seznam odborné literatury:

Bláha, J. - Brada, K.: Hydraulické stroje, Praha, 1992.

Peňáz, V. - Benža, D.: Tekutinové mechanismy, VUT v Brně, Brno, 1990.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Klas, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.11.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce obsahuje základní rozdělení hydrogenerátorů. Jsou zobrazeny různé typy těchto hydrogenerátorů rozšířené o základní výpočtové rovnice a charakteristiky. Hlavní část této práce je věnována popisu konstrukce radiálního pístového hydrogenerátoru včetně modifikací a kinematiky jeho chodu. U tohoto hydrogenerátoru sledujeme velikost pulsace průtoku, vliv parametrů hydrogenerátoru na jejich velikost a rovnoměrnost dodávky pracovní kapaliny. Na závěr práce je vše vyhodnoceno a zobrazeno grafy.

ABSTRACT

This bachelor thesis contains a basic division of hydraulic pumps. Different types of these hydraulic pumps are presented along with basic computational equations and characteristics. The main part of this thesis is devoted to the description of design of radial piston pump including modifications and kinematics of its operation. The size of pulsation flow, influence of hydraulic pump parameters on their size and continuity of working fluid supply are observed. The thesis is concluded with the evaluation of the issues concerned and supplemented with graphs.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydrogenerátor, radiální pístový hydrogenerátor, pulsace

KEYWORDS

Hydraulic pump, radial piston pump, pulsation flow

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAPOUN, L. Radiální pístový hydrogenerátor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Klas, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Radiální pístový hydrogenerátor jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně, 25. května 2012

.....

Lukáš Kapoun

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce ing. Romanu Klasovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	x
Úvod	1
1 Hydrogenerátory	2
1.1 Rozdělení hydrogenerátorů.....	3
1.2 Základní vztahy a charakteristiky hydrogenerátorů.....	6
1.2.1 Statické charakteristiky hydrostatických hydrogenerátorů.....	7
1.3 Zubové hydrogenerátory	11
1.4 Šroubové hydrogenerátory.....	12
1.5 Lamelové hydrogenerátory	13
1.6 Pístové hydrogenerátory	14
1.6.1 Axiální pístové hydrogenerátory.....	14
1.6.2 Řadové pístové hydrogenerátory.....	15
2 Radiální pístový hydrogenerátor	16
2.1 Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru.....	16
2.1.1 Princip a základní popis konstrukce.....	16
2.2 Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými v rotoru.....	18
2.2.1 Princip a popis konstrukce.....	18
2.2.2 Stanovení průtoku radiálního pístového hydrogenerátoru.....	19
3 Závěr	24
Literatura	25
Seznam použitých symbolů a veličin	26
Seznam příloh	27

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1.1: Schematické značky hydrogenerátorů.	3
Obr. 1.2.2: Teoretické charakteristiky hydrogenerátorů[4]	7
Obr. 1.2.3: Skutečné průtokové charakteristiky [4]	8
Obr. 1.2.4: Skutečné momentové charakteristiky hydrogenerátoru [4]	9
Obr. 1.2.5: Závislost Q na n a Δp [4].....	9
Obr. 1.2.6: Průběhy závislostí průtokové, tlakové a celkové účinnosti na otáčkové frekvenci a na tlakovém spádu [4]	10
Obr. 1.2.7: Závislost parametrů hydrogenerátoru[4].....	10
Obr. 1.3.8: Typy zubových hydrogenerátorů [5]	11
Obr. 1.4.9: Dvouvrетенový hydrogenerátor s odlehčením vřeten[4]	12
Obr. 1.5.10: Lamelové hydrogenerátory	13
Obr. 1.6.11: Axiální pístový hydrogenerátor [2]	14
Obr. 2.2.12: Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru [4].....	17
Obr. 2.2.13: Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru [2].....	17
Obr. 2.2.14: Schéma radiálního pístového hydrogenerátoru s písty vedenými v rotoru[3]	18
Obr. 2.2.15: Schéma radiálního pístového hydrogenerátoru s křivkovou oběžnou drahou[3]	18
Obr. 2.2.16: Průběh průtoku na výtlaku za dobu jedné otáčky pro 7 pístů	22
Obr. 2.2.17: Velikost průtoku jednoho pístu v závislosti na natočení	22

ÚVOD

Hydrogenerátor, pro většinu známý jako vysokotlaké hydrostatické čerpadlo je druh hydraulického stroje, který slouží k přeměně mechanické energie poháněného stroje na hydraulickou energii kapaliny. Kapalina je pracovním médiem tudíž nositelkou energie. Hydrogenerátory slouží k vytváření tlaku kapaliny daného objemu.

V historii, stejně jako dnes měla čerpací technika svá důležitá dokonce nepostradatelná postavení, i když trochu v jiném smyslu než je nám známo nyní. Čerpání pitné či užitkové vody zajišťovalo životní podmínky člověka a lidské civilizaci. První výskyt čerpadel je znám z období starověku, která byla většinou poháněna lidskou či zvířecí silou. Čerpací technika jako nauka o procesu čerpání kapalin, se rozvíjela spolu s civilizačním úsilím lidstva a k jejímu dynamickému rozvoji došlo v 19. století a zejména pak ve 20. století. [1] Z důvodu probíhajícího průmyslového rozvoje bylo požadováno konstruovat výkonnější a dokonalejší čerpadla.

Využití čerpací techniky je dnes velmi rozsáhlé a nepostradatelné. O důležitosti není třeba pochybovat, jedná se o druhý nejpoužívanější stroj v současnosti, hned po elektromotoru. Nejčastěji se využívá v průmyslu ale i jiném odvětví, asi největší využití má jaderná a tepelná energetika, kde asi desetina vyrobené energie je spotřebována na provoz vlastní čerpací techniky. Dále máme další odvětví, které využívá hydraulické techniky a to například ve vodárenském průmyslu pro přečerpávání odpadních vod, potravinářském průmyslu pro přesné dávkování surovin, ve stavebním, těžebním průmyslu v hospodářství pro zavlažování, či ve strojírenství a v mnoha dalších odvětvích. Jejich důležitost si však mnozí ani neuvědomují, a však nás doprovází ve všech různých lidských činnostech.

Z důvodů velké rozsáhlosti hydraulických kapalin a potřeby jejich čerpání snad ve všech oblastech lidské činnosti, je zapotřebí vyrábět mnoho druhů hydrogenerátorů, podle mnohých požadavků, ať se jedná o velikost, výkon, či složitost konstrukce.

V dnešní době, kde máme spoustu druhů hydrogenerátorů, je kladen důraz spíše na zlepšování a zdokonalování jejich konstrukce, jak na hledání nových a lepších druhů. Při konstruování je požadována celková úspora, jak na použitý materiál pro konstrukci, tak na samotný energeticky úsporný chod generátorů, u kterých se požadují vysoké účinnosti.

1 HYDROGENERÁTORY

Hydrogenerátor je hydraulický prvek určený k přenosu energie z poháněcího motoru na kapalinu, neboli z tuhých částí na sloupec kapaliny. U odstředivých generátorů je převáděna kinetická energie, u hydrostatických (objemových) generátorů se převádí tlakové energie. Dále bude věnována pozornost pouze druhé skupině a to hydrostatickým generátorům.[2]

Hydrogenerátor je jiným názvem vysokotlaké hydrostatické čerpadlo používané v hydrostatických mechanismech. Určující není přečerpávání kapaliny, ale vytváření (generování) tlaku kapaliny daného objemu.[1]

Objemový hydrogenerátor je zdrojem proudu kapaliny, kterému udílí tlakovou energii a potřebnou kinetickou energii. Vlastnosti proudu ovlivňuje pohybovou frekvenci hydraulického motoru. Velikost tlaku na výstupu z generátoru se nastaví podle odporu ve výstupním potrubí, který je dán zatížením motoru a odpory vlastního hydraulického mechanismu.

Na generátory používané v hydrostatických mechanismech jsou kladeny některé požadavky, které lze vystihnout v několika bodech:

- co nejrovnoměrnější proud kapaliny
- co největší svodový odpor
- malý vnitřní odpor
- malé rozměry
- tichý a klidný chod
- vysoká životnost a spolehlivost

Proud generátoru má mít být co nejrovnoměrnější, tedy co nejmenší amplitudu proudových pulsací, které vznikají nerovnoměrnou změnou geometrického objemu v průběhu činnosti generátoru. Velikost amplitudy závisí na počtu prvků vytvářející geometrický objem. Čím je počet těchto prvků vyšší, tím je amplituda menší. Tato zásada platí obecně pouze v případě, že porovnáváme jen sudé počty nebo jen liché počty prvků. Pro rovnoměrnost proudu je příznivější lichý počet než nejbližší vyšší sudý počet těchto prvků.

Velikost svodového odporu je dána dokonalostí utěsnění oddělených prostorů generátoru, především geometrického objemu. Míra utěsnění závisí na velikosti vůlí mezi vzájemně se pohybujícími částmi a na dodržení jejich geometrických tvarů. Vysoká proudová účinnost je podmíněna velkým svodovým odporem generátoru.

Vnitřní odpor generátoru je určen součtem všech odporů proti pohybu, proti zrychlení, případně proti deformaci v generátoru. Jsou to odpory dané změnami směru proudu kapaliny, náhlými změnami průřezů kanálů, stykem dvou vzájemně se pohybujících částí, hmotnostní částí a kapaliny, které urychlujeme, pružností některých součástí apod.

Požadavek *malých rozměrů* vede ke konstruování generátorů s vysokou pohybovou frekvencí a s vysokým jmenovitým tlakem. Rychloběžnost generátoru je omezena

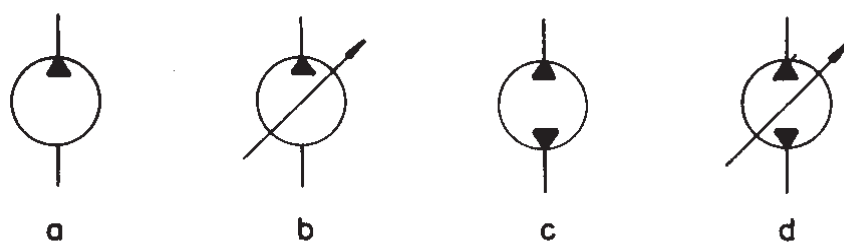
samonasávací schopností a nebezpečím výskytu kavitace. Toto omezení lze odstranit zařazením pomocného přeplňovacího generátoru. Tím se však snižuje efekt vyplývající z rychloběžnosti. Výška tlaku, která může být v generátoru vyvozena, je omezena pevností jeho součástí, požadovanou proudovou účinností, životností a povolenou mírou hlučnosti.[3]

1.1 Rozdělení hydrogenerátorů

Základním parametrem každého hydrogenerátoru je jeho geometrický objem V_0 . Je definován jako objem pracovního prostoru hydrogenerátoru odpovídající jedné otáčky nebo jednomu zdvihu. [4]

Generátory rozdělujeme především podle toho, jsou-li konstruovány s konstantním geometrickým objemem (neregulační) nebo s měnícím se geometrickým objemem (regulační). U neregulačních generátorů lze dosáhnout zvýšení či snížení proudu kapaliny pouze změnou pohybové frekvence generátoru. Regulační generátory umožňují nastavení různých velikostí geometrického objemu, čímž mění velikosti proudu při konstantní pohybové frekvenci generátoru. U některých konstrukcí hydrogenerátorů je možné měnit smysl proudu kapaliny při zachování smyslu otáčení rotoru.[2]

Schematické značky hydrogenerátorů:



Obr. 1.1.1: Schematické značky hydrogenerátorů.

(Trojúhelník označuje směr toku kapaliny.)[1]

a - jednosměrný neregulační, b - jednosměrný regulační,

c - dvousměrný neregulační, d - dvousměrný regulační

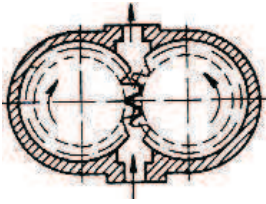
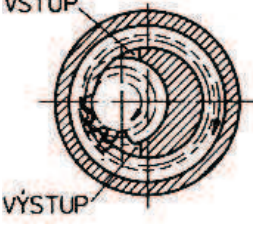
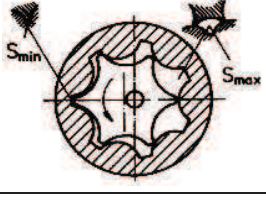
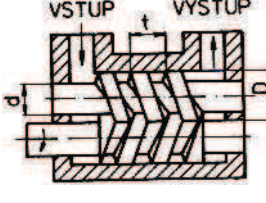
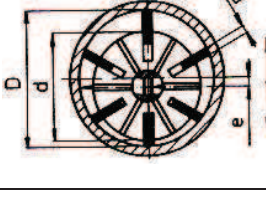
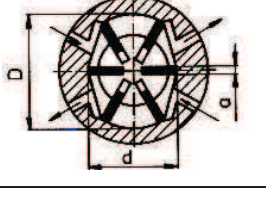
Podle možnosti pracovat v jednom nebo obou směrech otáčení rozeznáváme hydrogenerátory bez reverzace nebo s reverzací otáčení. U hydrogenerátorů bez reverzace nelze měnit smysl otáčení bez úprav (pravotočivé či levotočivé), naopak reverzní generátory mohou pracovat při libovolném smyslu otáčení.[4]

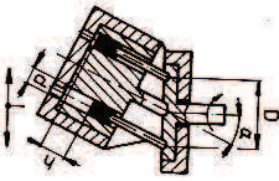
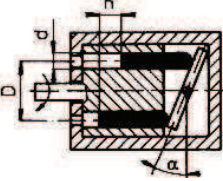
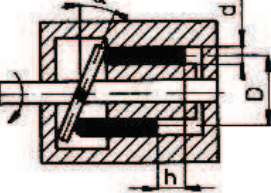


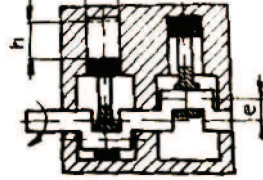
Dále podle způsobu plnění rozlišujeme hydrogenerátory bez plnění a s plněním. Hydrogenerátory bez plnění jsou schopny nasávat kapalinu přímo z nádrže, ve vstupním kanálu tedy nevyžadují přetlak, některé typy naopak snesou podtlak až do několika setin MPa. Hydrogenerátory s plněním vyžadují pro dokonalé zaplnění pracovního prostoru určitý plnicí tlak, který je podle typu asi 0,05 až 1,5 MPa.

Z konstrukčního hlediska tj. podle prvků, kterými generátory vytvářejí geometrický objem, rozlišujeme hydrogenerátory *zubové, lamelové, šroubové, pístové, speciální* [4]

ZÁKLADNÍ TYPY HYDROGENERÁTORŮ

Tab. 1.1[1]

<p>Zubový s vnějším ozubením</p> 	<p>Pracovní prostor tvoří zubové mezery a strany tělesa. Nedá se měnit. Výtlak nastává při vstupu zubů do zubové mezery</p>	$V_0 = \pi \cdot m \cdot z \cdot b \cdot h$ <p>z – počet zubů m – modul ozubení b – šířka zubu h – výška zubu</p>	<p>$p_{max} = 16 \text{ až } 32 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 25 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Zubový s vnitřním ozubením</p> <p>VSTUP</p>  <p>VÝSTUP</p>	<p>Stejný princip jak předchozí typ</p>	$V_0 = \pi \cdot m \cdot z \cdot b \cdot h$ <p>z – počet zubů vnitřního kola</p>	<p>$p_{max} = 32 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 25 \text{ až } 60 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Prstencový s vnitřním ozubením</p>  <p>S_{min} S_{max}</p>	<p>Rotor s vnějším ozubením má o jeden zub méně jak počet mezer vnějšího prstence. Pracovní prostor se nedá měnit</p>	$V_0 = \pi \cdot m \cdot z \cdot b \cdot h$ <p>z – počet zubů vnitřního kola</p>	<p>$p_{max} = 12 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 25 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Šroubový (vřetenový)</p> <p>VSTUP VÝSTUP</p> 	<p>Pracovní prostor tvoří šroubovice a těleso převodníku. Vytlačení nastává při vzájemném dotyku vřeten. Pracovní prostor se nedá měnit</p>	$V = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot t - \left(\pi \cdot D^2 \cdot \frac{\alpha}{360} - \frac{D^2}{2} \cdot \sin 2\alpha \right) \cdot t$ <p>kde $a = \frac{D+d}{2D}$</p>	<p>$p_{max} = 16 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 70 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Lamelový s vnitřním rozvodem (příklad: s kruhovým státorem)</p> 	<p>Lamely se pohybují v drážkách rotoru a tvoří s tělesem a rotorem pracovní prostor. U kruhového statoru se dá měnit excentricita e velikost pracovního prostoru. U křivkového statoru se odlehčí zatížení rotoru od radiálních sil</p>	$V = b \cdot \left[\frac{\pi \cdot D^2 - d^2}{4} - a \cdot z \cdot (D - d) \right]$ <p>b – šířka lamely a – tloušťka lamely z – počet lamel</p>	<p>$p_{max} = 10 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 70 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Lamelový s vnějším rozvodem (příklad s křivkovým státorem)</p> 	<p>Za dobu jedné otáčky proběhnou dva cykly. Pracovní prostor se nedá měnit</p>	<p>stejně jako v předchozím příkladě</p>	<p>$p_{max} = 16 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>

<p>Axiální pístový s nakloněnou deskou</p> 	<p>Písty kmitající axiálně v pevném bloku válců, nakloněná deska se otáčí, prostor se mění změnou sklonu desky</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = D \cdot \tan \alpha$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 40 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Axiální pístový s nakloněnou deskou a rotujícím blokem válců</p> 	<p>Písty kmitají axiálně v rotujícím bloku válců. Pracovní prostor se mění změnou sklonu desky</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = D \cdot \tan \alpha$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 40 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Axiální pístový s nakloněným blokem válců</p> 	<p>Těleso s písty a deskou s ojnicemi kmitají rovnoběžně s osou bloku válců. Pracovní prostor se mění změnou sklonu bloku válců</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = D \cdot \sin \alpha$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 40 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 50 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Radiální pístový s vnějším vedením pístů</p> 	<p>Stator s kruhovou dráhou je vůči rotoru uložen excentricky. Při rotaci rotoru písty kmitají radiálně. Pracovní prostor se dá měnit změnou excentricity e</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = 2 \cdot e$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 60 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 30 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Radiální pístový s vnitřním vedením pístů</p> 	<p>Excentricky uložený hřídel rotuje. Změnou excentricity se dá měnit pracovní prostor. Písty kmitají radiálně</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = 2 \cdot e$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 70 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 10 \text{ až } 30 \text{ s}^{-1}$</p>
<p>Řadový</p> 	<p>Klíkový hřídel se otáčí, písty kmitají axiálně, Velikost pracovního prostoru se nedá měnit</p>	$V_0 = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$ $h = 2 \cdot e$ <p>z – počet válců</p>	<p>$p_{max} = 250 \text{ MPa}$</p> <p>$n = 15 \text{ až } 30 \text{ s}^{-1}$</p>

1.2 Základní vztahy a charakteristiky hydrogenerátorů

Objemový průtok rotačního hydrostatického hydrogenerátoru pro bezztrátové (teoretické) poměry je dán rovnicí

$$Q_h = V_0 \cdot n . \quad (1)$$

Pro teoretický kroutící moment rotačního hydrostatického generátoru obecně platí

$$M_{th} = \frac{P_{th}}{\omega} , \quad (2)$$

odkud po dosazení za $P_{th} = Q_{th} \cdot \Delta p = V_0 \cdot n \cdot \Delta p$ a za $\omega = 2\pi n$ obdržíme vztah

$$M_{th} = \frac{V_0}{2\pi} \cdot \Delta p . \quad (3)$$

Pro zjednodušení popisu hydrostatických hydrogenerátorů se vedle pojmu geometrický objem V_0 používá rovněž veličina q – charakteristický objem hydrostatického hydrogenerátoru, tj. objem kapaliny protékající hydrostatickým hydrogenerátorem při nulovém ztrátovém průtoku při otočení o jeden radián:

$$q = \frac{V_0}{2\pi} \quad (4)$$

Vztah (1) a (3) napíšeme tedy ve tvaru

$$Q_{th} = q \cdot \omega , \quad (5)$$

$$M_{th} = q \cdot \Delta p . \quad (6)$$

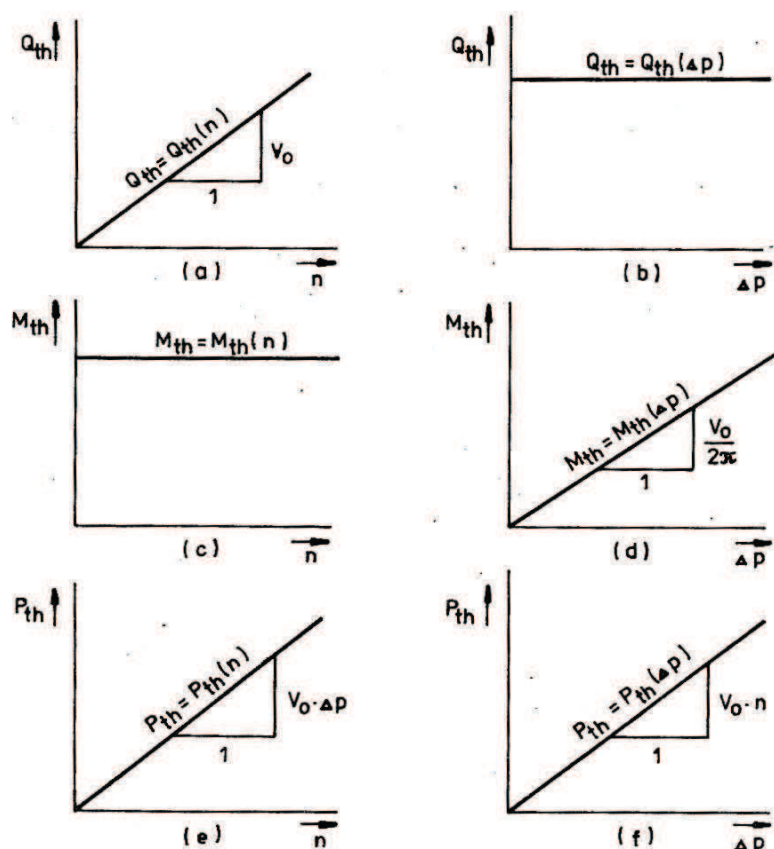
Odvozené vztahy platí pro hydrostatický hydrogenerátor a nezávisí na druhu konstrukce. Ze vztahu vyplývá, že v ideálním hydrostatickém hydrogenerátoru se otáčky přetransformují na průtok, přičemž je nezávislý na tlaku.

Vztahy (1), (3), resp. (5),(6) představují základní vzájemné vztahy parametrů hydrostatického hydrogenerátoru, určují vztah mezi hydraulickými (q , Δp) a mechanickými (M , n nebo ω) veličinami – odtud jejich označení rovnice vazeb. Znázornění vztahů mezi základními parametry hydrostatických hydrogenerátorů v diagramech se nazývají teoretické charakteristiky hydrogenerátorů (obr. 1.2.2)

Dosud uvedené rovnice vazeb platí pro rotační hydrostatické hydrogenerátory. Pro hydrogenerátory s přímočarým pohybem činného prvku platí zcela analogické vztahy. Použijeme-li jako charakteristickou veličinu plochu činného prvku S , transformuje se průtok na rychlost a tlakový spád na sílu, z toho vyplývají vztahy: [4]

$$Q_{th} = S \cdot v . \quad (7)$$

$$F_{th} = S \cdot \Delta p \quad (8)$$



Obr. 1.2.2: Teoretické charakteristiky hydrogenerátorů[4]

1.2.1 Statické charakteristiky hydrostatických hydrogenerátorů

Hydrostatické hydrogenerátory pracují ve skutečných podmínkách vazké, stlačitelné kapaliny, při vůlích mezi činnými prvky generátoru a s odpory v ložiscích, ucpávkách atd. Reálnost podmínek se projeví v rozdílu skutečných výstupních parametrů od teoretických, které jsou uvedeny v rovnicích (1) až (8).

Při ustáleném režimu práce, při konstantním průtoku a při konstantním tlakovém spádu je přeměna mechanické energie na tlakovou provázena průtokovými, mechanickými a hydraulickými ztrátami, které je třeba zahrnout do výpočtů.

Průtokové ztráty jsou způsobeny únikem kapaliny vůlemi mezi pracovními prvky, nedostatečným zaplňováním pracovních komor, pohlcenými plyny v kapalině, stlačitelností kapalin a deformacemi pracovních komor vlivem tlaku. Součet uvedených ztrát dává ztrátový průtok Q_z .

Skutečný průtok hydrogenerátoru se bude od teoretického průtoku lišit o hodnotu Q_z , tedy skutečný průtok bude menší jak teoretický: [4]

$$Q = Q_{th} - Q_z. \quad (9)$$

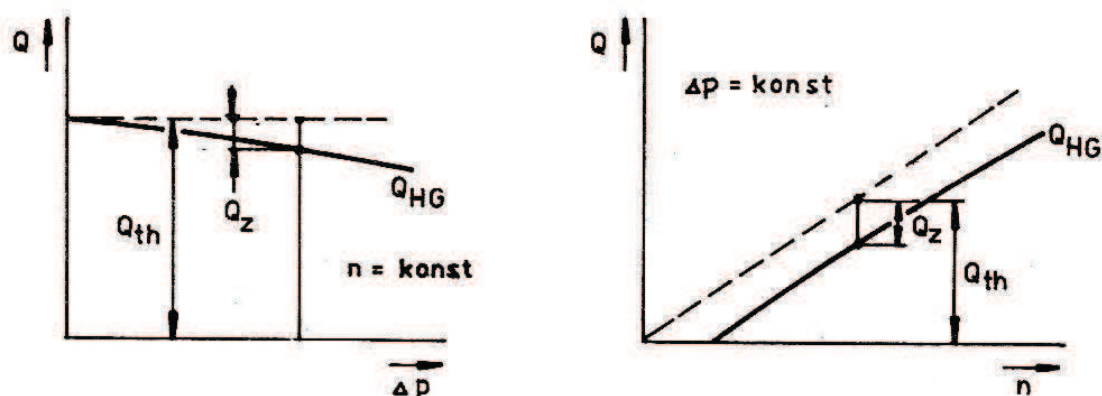
Průtoková účinnost

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_{th}} = \frac{Q_{th} - Q_z}{Q_{th}} = 1 - \frac{Q_z}{Q_{th}}$$

odkud

$$Q = Q_{th} \cdot \eta_Q = V_0 \cdot n \cdot \eta_Q \quad (10)$$

Vlivem průtokových ztrát budou skutečné výsledné průtokové charakteristiky $Q=Q(n)$ a $Q=Q(\Delta p)$ podle obr. 1.2.2.



Obr. 1.2.3: Skutečné průtokové charakteristiky [4]

Mechanické ztráty jsou způsobeny třením – projeví se na hřídeli hydrostatického hydrogenerátoru jako ztrátový moment složený z následujících složek:

- třecí složka momentu závislá na normálních silách a tedy úměrná tlaku
- třecí složka momentu způsobená tečným smykovým napětím vrstev viskózní kapaliny a tedy úměrná rychlosti
- třecí složka konstantní, na tlaku a rychlosti nezávisí

Hydraulické ztráty jsou způsobeny pohybem viskózní kapaliny vnitřními kanály hydrogenerátoru. Vzhledem k tomu, že tyto ztráty jsou ve srovnání s mechanickými a průtokovými ztrátami zanedbatelné, navíc dle vztahu (3) resp. (8) se kroutící moment (případně síla) transformuje v hydrogenerátoru na tlak, zahrnují se hydraulické ztráty do ztrát mechanických a uvádějí se jako tzv. mechanicko-hydraulické nebo lépe tlakové ztráty.

Celkový ztrátový moment M_z mechanicko-hydraulických ztrát tvoří rozdíl mezi teoretickým a skutečným momentem na hřídeli hydrogenerátoru. Bude tedy v hydrogenerátoru potřebný moment na hřídeli větší než teoretický při stejném tlakovém spádu mezi výstupem a vstupem do hydrogenerátoru

Při stejném tlakovém spádu mezi výstupem a vstupem hydrogenerátoru bude tedy zapotřebí větší moment na hřídeli, než je moment teoretický:

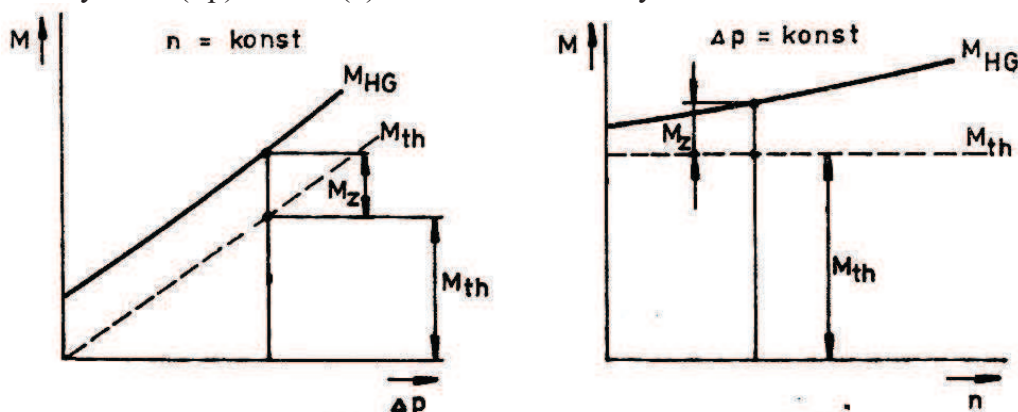
$$M = M_{th} + M_z \quad (11)$$

Tlaková účinnost hydrogenerátoru

$$\eta_p = \frac{M_{th}}{M} = \frac{M_{th}}{M_{th} + M_z} = \frac{1}{1 - \frac{M_z}{M_{th}}}$$

$$\text{odkud} \quad \Delta p = \frac{2\pi}{V_0} \cdot M \cdot \eta_p \quad (12)$$

Vlivem mechanicko-hydraulických ztrát jsou skutečně výsledné momentové charakteristiky $M=M(\Delta p)$ a $M=M(n)$ odlišné od teoretických – obr. 1.2.3.

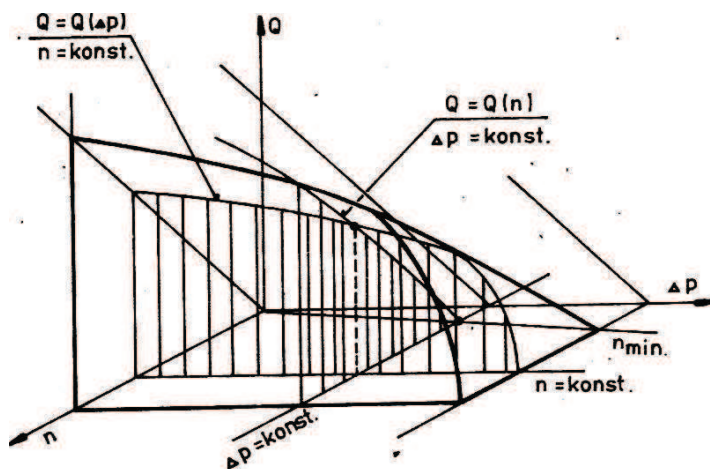


Obr. 1.2.4: Skutečné momentové charakteristiky hydrogenerátoru [4]

Vztahy mezi jednotlivými základními parametry hydrostatického hydrogenerátoru znázorňujeme graficky v diagramech, které se nazývají charakteristiky hydrogenerátorů. Základními parametry jsou průtok, otáčková frekvence, tlak a krouticí moment, které ovlivňují výkon a účinnost hydrogenerátoru. Další vlivy, jako teplota, pracovní kapaliny, její měrná hmotnost a viskozita jsou v těchto závislostech považovány za konstantní. Zobrazení se většinou provádí v jednoduchých závislostech na jedné z proměnných, zatímco druhá se nemění, je parametrem sledovaných závislostí. Nejdůležitější průběhy byly zobrazeny na obr. 1.2.3 a obr. 1.2.4.

Druhý způsob zobrazení, který je méně obvyklý, ale dává lepší představu o celkovém charakteru sledované veličiny, je zobrazení v prostorovém diagramu, např. $Q=Q(n, \Delta p)$ na obr. 1.2.5.

Jednoduché závislosti Q na n nebo Δp obdržíme jako řezy prostorovým diagramem rovinými kolmými na osu n (rovina řezu vytíná na ploše křivku odpovídající konstantním otáčkám) nebo na osu Δp (křivka odpovídá konstantnímu tlakovému spádu).



Obr. 1.2.5: Závislost Q na n a Δp [4]

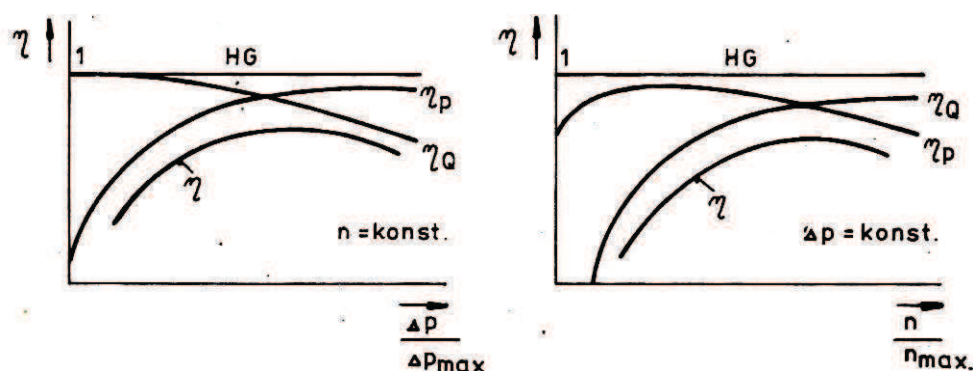
Celková účinnost hydrostatického hydrogenerátoru:

$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta p}{M_k \cdot \omega} \quad (13)$$

Po dosažení za výstupní parametry platí

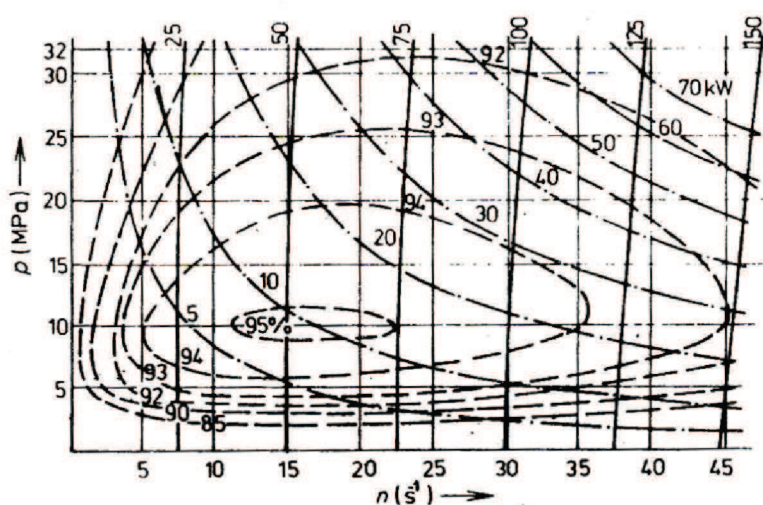
$$\eta = \eta_Q \cdot \eta_P \quad (14)$$

Typické průběhy závislostí průtokové η_Q , tlakové η_P a celkové účinnosti na otáčkové frekvenci a na tlakovém spádu pro hydrogenerátor jsou na obr. 1.2.6.



Obr. 1.2.6: Průběhy závislostí průtokové, tlakové a celkové účinnosti na otáčkové frekvenci a na tlakovém spádu [4]

Vzájemné závislosti parametrů hydrogenerátorů v ustáleném režimu se někdy uvádějí v univerzální charakteristice, kam se vedle průtoku, tlaku, otáček a kroutícího momentu vynášejí ještě křivky konstantní celkové účinnosti a konstantního výkonu, které lze vidět na obr. 1.1.7. [4]



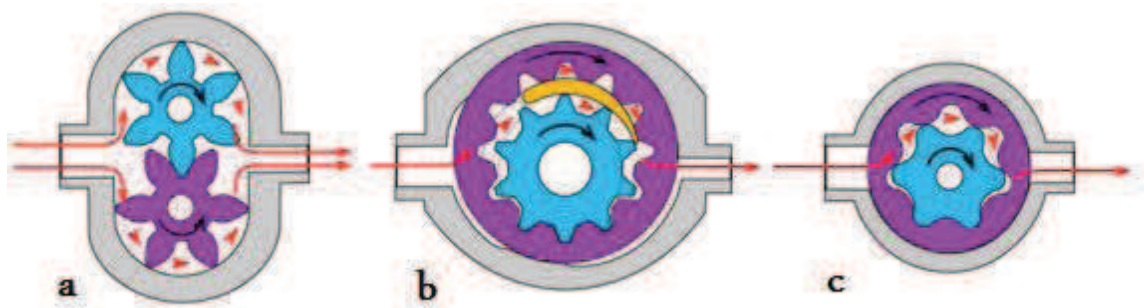
Obr. 1.2.7: Závislost parametrů hydrogenerátoru [4]

1.3 Zubové hydrogenerátory

Zubové hydrogenerátory patří mezi nejrozšířenější druh hydrogenerátorů s konstantním geometrickým objemem. Důvodem jejich rozšířenosti je jednoduchost, výrobní nenáročnost, spolehlivost a nízká cena. Jejich použití je rozmanité, nejvíce však pro regulační obvody nebo pro obvody s přímočarými hydromotory. Vykazují dobrou nasávací schopnost, proto se používají v otevřených obvodech nebo jako doplňující hydrogenerátor hlavního vysokotlakého hydrogenerátoru v uzavřených obvodech.[4][1]

U zubových hydrogenerátorů rozlišujeme dvě základní koncepce:

- Zubové hydrogenerátory s vnějším ozubením (obr. 1.3.8a)
- Zubové hydrogenerátory s vnitřním ozubením, ty se dále dělí na:
 - Hydrogenerátory s evolventním ozubením (obr. 1.3.8b)
 - Hydrogenerátory výstředníkové (gerotorové) s cykloidním ozubením (obr. 1.3.8c)



Obr. 1.3.8: Typy zubových hydrogenerátorů [5]

Využití zubových hydrogenerátorů

Zubové hydrogenerátory lze využívat v tandemovém (násobném) uspořádání, kde lze kombinovat prakticky všechny typové řady ve dvoj nebo trojnásobném provedení (ve speciálních případech pětinasobné). Používají se zejména ve složitějších hydraulických obvodech vozidel a manipulačních strojů, kde nabízí výhodu úspory zástavbového prostoru i počtu pohonů hydrogenerátorů. [6]

Výhody: Hlavní výhodou těchto hydrogenerátorů je jednoduchá konstrukce, tím způsobená nízká výrobní cena. Další výhodou je dobrá spolehlivost a důležitá kladná vlastnost je jejich možnost reverze.

Nevýhody: Nevýhoda je značná hlučnost provozu těchto čerpadel

1.4 Šroubové hydrogenerátory

Šroubové hydrogenerátory (obr. 1.4.9) se vyznačují jejichmi činnými částmi, které způsobují pohyb kapaliny. Tyto činné části mají tvar šroubových vřeten se třemi základními druhy závitových profilů, a to se závitovým profilem obdélníkovým, lichoběžníkovým nebo cykloidním. Tyto hydrogenerátory mají plynulý průtok téměř bez pulsací a nízkou provozní hlučnost. Jedná se o neregulační hydrogenerátory bez reverzace otáčení.[2][4]

Šroubové hydrogenerátory se vyrábějí v provedení:

- Jendnovřetenové
- Dvouvřetenové
- Třívřetenové

Podle provozního tlaku rozdělujeme šroubové hydrogenerátory na:

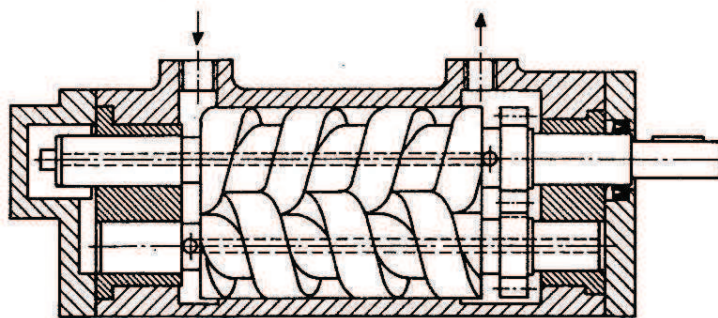
- Nízkotlaké $p = 1,5$ až 2 MPa, $L = (1,5$ až $2)$ s.
- Středotlaké $p = 5,0$ až 8 MPa, $L = (3$ až $4)$ s.
- Vysokotlaké $p = 15$ až 20 MPa, $L = (6$ až $8)$ s.

Liší se především délkou vřeten L , (s-stoupání závitu)

Využití šroubových hydrogenerátorů: šroubové hydrogenerátory se používají v těch hydraulických mechanismech, kde jejich hlavní výhody, tj. rovnoměrný průtok a nízká hlučnost, vyváží náročnou výrobu a vyšší cenu. Krom toho jsou uplatňovány v chemickém a potravinářském průmyslu, mazací technice, ve stavbě lodí, v přepravní technice jako stroje pro čerpání vysoce viskózních látek, a pro velké průtoky nedosažitelné jinými hydrostatickými generátory. Příklad tohoto využití je čerpání ropy, pro kterou byl vyroben generátor s průtokem $333 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Výhody: plynulá dodávka kapaliny, tichý a vyrovnaný chod, využitelnost pro vyšší tlaky jako u zubových hydrogenerátorů, velmi dobrá sací schopnost, kde dovolený vstupní tlak může být až $-0,05$ MPa. Nejsou příliš náročné na čistotu kapaliny.

Nevýhody: složitá výroba šroubových vřeten v požadované přesnosti a kvalitě povrchu



Obr. 1.4.9: Dvouvřetenový hydrogenerátor s odlehčením vřeten[4]

1.5 Lamelové hydrogenerátory

Základními částmi lamelového hydrogenerátoru jsou rotor otáčející se uvnitř statoru a ploché, radiálně pohybující se lamely, umístěné v drážkách rotoru nebo statoru, podle toho dále rozdělujeme lamelové hydrogenerátory s:

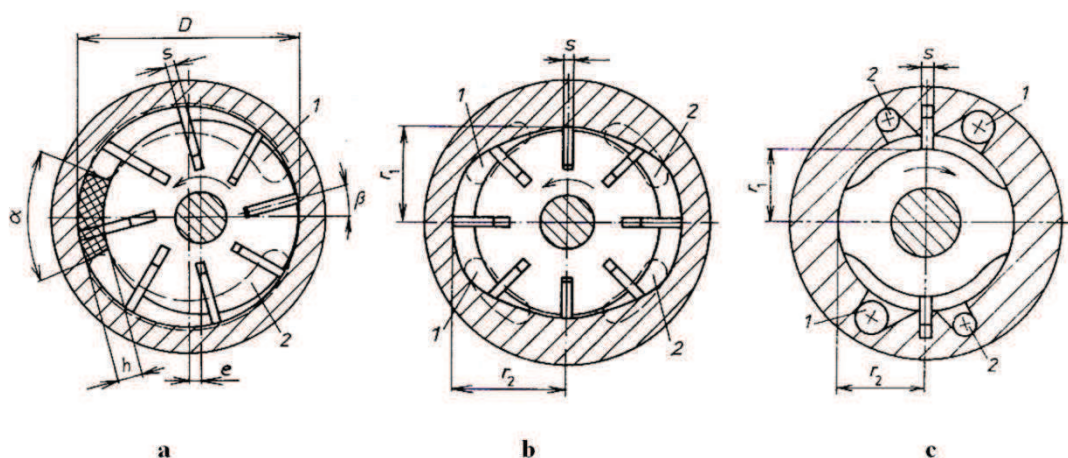
- lamelami vedenými v rotoru
- lamelami vedenými ve statoru

Využití lamelových hydrogenerátorů:

využití najdeme v různých průmyslových oborech. Používají se v mobilních zařízeních v obvodech servořízení osobních i nákladních automobilů, stejně tak pro stroje stavební, dopravní apod. Dále se vyskytují v obráběcích strojích a menších lisech. [4]

Výhody: lamelové hydrogenerátory mají velmi vhodný poměr geometrického poměru k vlastní hmotnosti a vnějším rozměrům. Generátor s vyváženým rotorem má vůbec nejlepší poměr výkonu k vlastní hmotnosti ze všech typů hydrogenerátorů. Jejich hlavní výhoda je tichý chod, dobrá rovnoměrnost proudu a schopnost pracovat při trvalém zatížení i vysokých otáčkách s vysokou spolehlivostí i životností. [4]

Nevýhody: Nevýhodou lamelových hydrogenerátorů je menší objemová i celková účinnost. Náročnost na přesnost výroby. Opotřebení lamel a vnitřní strany statoru vlivem tření.



Obr. 1.5.10: Lamelové hydrogenerátory

- a) Lamelový hydrogenerátor s nevyváženým rotorem
 - b) Lamelový hydrogenerátor s vyváženým rotorem
 - c) Lamelový hydrogenerátor s lamelami vedenými ve statoru
- 1 - vstup, 2 – výstup [2]

1.6 Pístové hydrogenerátory

Společným znakem všech typů pístových hydrogenerátorů je, že činným (pracovním) elementem je píst kruhového průřezu, který se přímočaře pohybuje ve válci. Jednotlivé typy pístových hydrogenerátorů se liší zejména kinematikou pohonu pístů a rozvodem kapaliny v hydrogenerátoru. Pístové hydrogenerátory se konstruují jak neregulační tak i regulační. [1]

Podle polohy pístů vzhledem k ose rotace rozdělujeme pístové hydrogenerátory

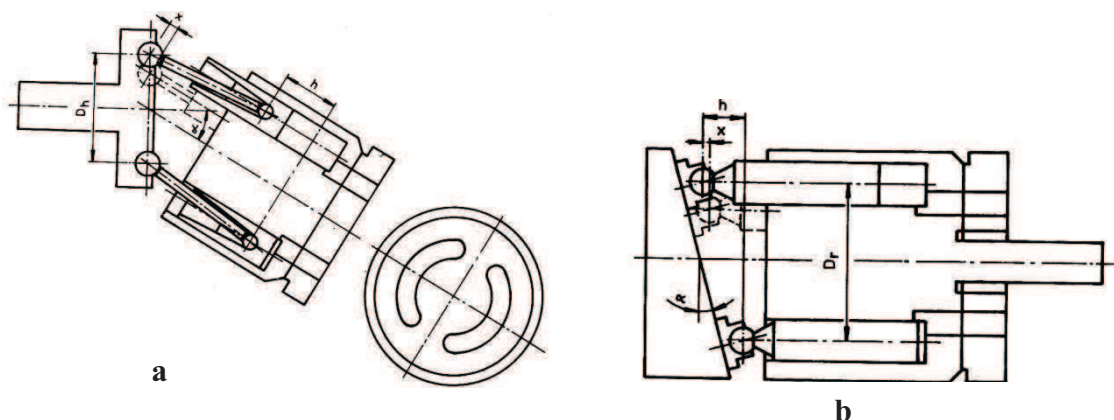
- Axiální pístové hydrogenerátory
- Řadové pístové hydrogenerátory
- Radiální pístové hydrogenerátory

1.6.1 Axiální pístové hydrogenerátory

Základním principem práce axiálních pístových hydrogenerátorů je, že písty jsou umístěné ve válcích s axiální osou (souosou s hřídelem hydrogenerátoru) nebo skloněné o úhel menší než 45° . Geometrický objem u těchto typů hydrogenerátorů se dá jednoduše řídit změnou zdvihu pístu, axiální hydrogenerátory tvoří proto naprostou většinu dnes vyráběných regulačních hydrogenerátorů. [1][4]

Axiální hydrogenerátor se skládá z hřídele, bloku válců v nichž se pohybují písty, rozvodu a tělesa. Podle konstrukce dělíme tyto generátory na:

- Axiální pístový hydrogenerátor s nakloněným blokem válců (obr. 1.6.11a)
- Axiální pístový hydrogenerátor s nakloněnou deskou (obr. 1.6.11b)



Obr. 1.6.11: Axiální pístový hydrogenerátor [2]

a) s nakloněným blokem válců

b) s nakloněnou deskou

Využití axiálních hydrogenerátorů:

hydrostatické soustavy mobilních i stacionárních strojů a zařízení

Výhody: vysoký svodový odpor umožňuje přenos vysokých přenosů tlaků i proudu, a tím i výkon. Malé proudové pulsace, při lichém počtu válců (pět a více). Možná regulace velikosti proudu ve velkém rozsahu.

Nevýhody: konstrukčně i výrobně jsou složitější jak radiální pístové hydrogenerátory.

1.6.2 Řadové pístové hydrogenerátory

Řadové pístové hydrogenerátory mají osy válců v rovině procházející osou otáčení. Svým funkčním principem připomínají radiální pístové hydrogenerátory s písty vedenými ve statoru. V důsledku zvyšování pracovních tlaků u jiných druhů pístových hydrogenerátorů se jejich použití značně omezuje, jelikož mají ze všech druhů pístových hydrogenerátorů nejnižší měrný výkon na jednotku hmotnosti.[2][4]

Využití řadových hydrogenerátorů: pístové řadové hydrogenerátory jsou určeny především pro stacionární zařízení, převážně pro hydraulické lisy.

Výhody: tyto generátory se vyznačují především vysokou spolehlivostí a životností.

Nevýhody: nižší měrný výkon na jednotku hmotnosti v porovnání s jinými pístovými generátory, robustní konstrukce

2 RADIÁLNÍ PÍSTOVÝ HYDROGENERÁTOR

Tento typ hydrogenerátorů byl kdysi nejrozšířenějším pístovým hydrogenerátorem, neboť umožňoval pracovat s nejvyššími pracovními tlaky. Po částečném opadnutí zájmu o tento typ hydrogenerátoru se v posledních letech objevují znovu, podstatně zmodernizované konstrukce.[4]

Společným znakem všech konstrukčních koncepcí radiálních pístových hydrogenerátorů je, že písty se přímo přímočarým vratným pohybem pohybují ve válcích, rovnoměrně rozložených po obvodě a s osou kolmou na osu rotace hřídele.[1]

Podle odvedeného pohybu pístů rozdělujeme radiální pístové hydrogenerátory:

- s vnější tvořící křivkou (písty vedené v rotoru)
- s vnitřní tvořící křivkou (písty vedené ve statoru)

Radiální pístové hydrogenerátory se konstruují pro tlaky až 63 MPa. Při tomto tlaku přenáší proud kapaliny $Q = 1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ($1,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) výkon $P=1,05 \text{ kW}$. [3]

Využití radiálních pístových hydrogenerátorů

Pístová čerpadla se používají tam, kde je zapotřebí menších průtoků ale větších tlaků.

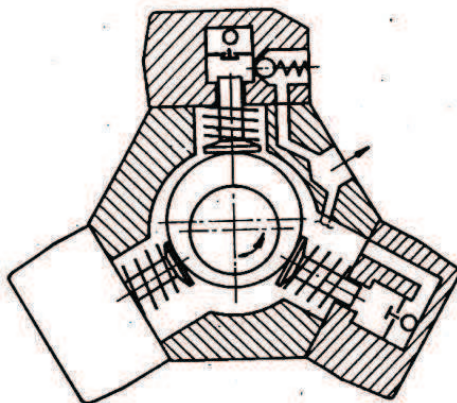
Výhody: Velmi tichý chod za provozu, možnost plynule měnit dodávaný průtok změnou excentricity. Velmi dobrá sací schopnost. Necitlivost vůči tlakovým změnám.

Nevýhody: problém s utěsněním pístů, aby nedocházelo k velkým ztrátám. Vysoká cena, složitější konstrukce. Velké udržovací náklady

2.1 Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru

2.1.1 Princip a základní popis konstrukce

U radiálního pístového hydrogenerátoru s písty vedenými ve statoru (obr. 2.2.12) se písty pohybují ve válcích, které jsou buď součástí tělesa statoru, nebo jsou k tělesu pevně připojeny. Písty se opírají svými spodními konci o výstředník, zpravidla přes hydrostaticky odlehčená kluzná uložení. Otáčením výstředníku, který je spojen s hnací hřídelí, jsou písty uváděny do přímočarého vratného pohybu. Rozvod kapaliny u těchto typů hydrogenerátoru je samočinný pomocí ventilů v každém válci. [4]

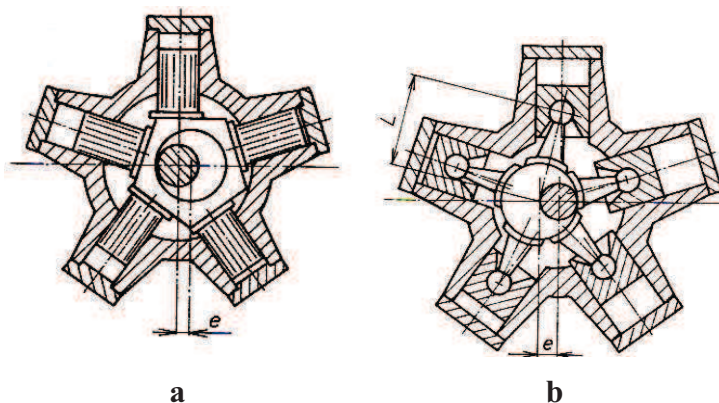


Obr. 2.2.12: Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru [4]

Počet pístů bývá 3, 5 nebo 7. Pro zlepšení rovnoměrnosti proudu kapaliny se používají dvě řady pístů, vzájemně pootočené o polovinu rozteče.

Konstrukce pohonu pístů se liší podle výrobce. Na obr. 2.2.13b mají ojnice kulový kloub v pístu. Ojnice mají na vnitřní straně hydrostatické ložisko na válcové ploše, která klouže po excentrickém kotouči. Rozvod kapaliny u těchto převodníků bývá radiálním nebo čelním rotačním šoupátkem a kapalina je přiváděna na vnější stranu pístů.

Jiný způsob pohonu pístů je u hydrogenerátoru na obr 2.2.13a. Mezi excentrem hřídele je vložen víceboký hranol, jehož počet stěn je rovný počtu pístů. Hranol se otáčí na výstředníku a písty se opírají o jeho stěny. Jsou silově vyváženy přivedením kapaliny na vnitřní dno vybrání, které je utěsněno ve stěnách hranolu. Tangenciální pohyb pístů vůči středu (ose) hranolu se vyrovnává posuvem pístu na stěnách hranolu. Kapalina je rozváděna rotačním šoupátkem, jehož pohyb je odvozen od otáčení hřídele. Vedená je do válců hřídelem přes hranol a vnitřkem pístů. [2]



Obr. 2.2.13: Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými ve statoru [2]

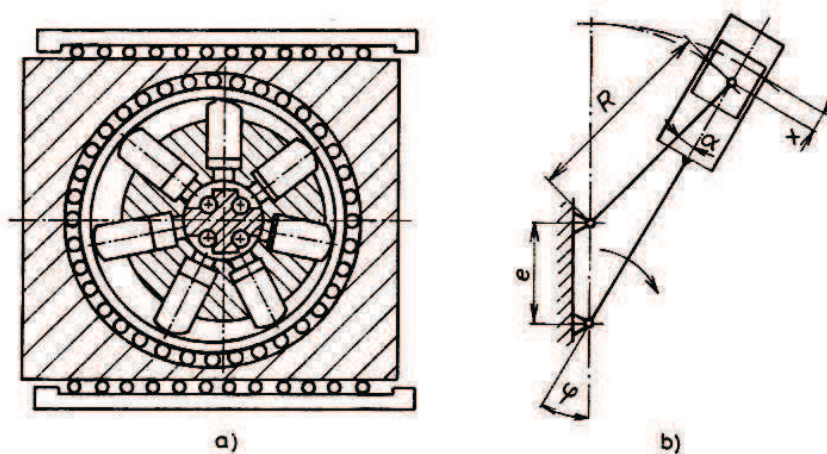
a) s vícebokým hranolem

b) s ojnicí s kulovým koncem v pístu

2.2 Radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými v rotoru

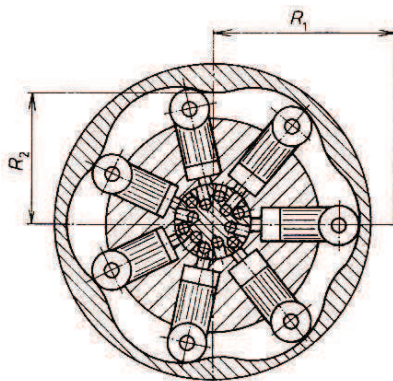
2.2.1 Princip a popis konstrukce

Radiální pístové hydrogenerátory se většinou vyrábějí s rotujícím blokem válců neboli písty vedenými v rotoru. Blok válců je otočně uložen na pevném čepu. V místě otvoru válců je čep ofrézován tak, že vytváří dva oddělené prostory. V první polovině otáčky je dírou v čepu kapalina přiváděna a nasávána do válců. V druhé polovině otáčky je kapalina vytlačována do druhého prostoru a odtud je kapalina vyvedena opět čepem do výtlačného kanálu hydrogenerátoru. Stálý styk pístů s dráhou ve statoru je zajištěn přitlačováním pružinami, tlakem kapaliny nebo vedením ve statoru. Změny proudu lze u regulačních hydrogenerátorů dosáhnout změnou výstřednosti (excentricity) rotoru k ose statoru.[3]



Obr. 2.2.14: Schéma radiálního pístového hydrogenerátoru s písty vedenými v rotoru[3]

Jiným typem radiálních pístových hydrogenerátorů s válci v rotujícím bloku jsou hydrogenerátory, u kterých je oběžná dráha tvořená křivkou podobné zkrácené epicykloidě (obr. 2.2.15). Písty tak vykonávají za jednu otáčku tolik pracovních zdvihů, kolik je vrcholů na oběžné dráze. Rozvod kapaliny na vnitřní straně pístů v rozvodovém čepu je uspořádán tak, aby byly vždy pod tlakem, popř. bez tlaku, písty nacházející se v daném okamžiku na oběžné dráze v místech se stejným smyslem stranosti.



Obr. 2.2.15: Schéma radiálního pístového hydrogenerátoru s křivkovou oběžnou dráhou[3]

2.2.2 Stanovení průtoku radiálního pístového hydrogenerátoru

Na základě geometrie a kinematiky radiálního pístového hydrogenerátoru uvedeme vztahy pro velikost průtoku s ohledem na počet pístů a natočení.

Z kinematického schématu (obr.2.2.14b.) je dráha pístu

$$x = (e + R) - (e \cdot \cos \varphi + R \cdot \cos \alpha) \quad (15)$$

kde R je poloměr oběžné dráhy (m)

φ - úhel pootočení hřídele (rad)

Úhel α je dán rovnicí

$$R \cdot \sin \alpha = e \cdot \sin \varphi \quad (16)$$

Dosazením do rovnice (15) obdržíme

$$x = e + R - \left(e \cdot \cos \varphi + \sqrt{R^2 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \quad (17)$$

Zdvih pístu obdržíme pro $\varphi = 2\pi$; bude $h=2e$ a odtud geometrický objem hydrogenerátoru

$$V_0 = 2e \cdot S \cdot z \quad (18)$$

Derivací dráhy podle času je dána rychlost pístu; vzhledem k $\varphi = \omega t$ platí:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \omega \frac{dx}{d\varphi} = e \cdot \omega \left(\sin \varphi + \frac{e}{R} \cdot \frac{\sin(2\omega t)}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{e}{R}\right)^2 \cdot \sin^2 \omega t}} \right) \quad (19)$$

Za předpokladu že $e \ll R$, se poměr e/R pod odmocninou zanedbá a lze napsat

$$v = e \cdot \omega \cdot \left(\sin \omega t + \frac{e}{R} \cdot \frac{\sin 2\omega t}{2} \right). \quad (20)$$

V definici průtoku v závislosti na natočení rotoru se často poměr e/R zanedbává, takové zanedbání způsobuje určité změny ve výsledném průtoku, proto jsme se rozhodli tyto výsledné hodnoty porovnat.

Okamžitý průtok je dán součtem dodávaných množství ze všech válců.

Okamžitý průtok se zanedbáním e/R je dán vztahem:

$$Q = \sum_{i=0}^{z-1} v_i \cdot S = e \cdot \omega S \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right) + \frac{e}{R} \cdot \frac{\sin \left[2 \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right) \right]}{2} \right] \quad (21)$$

přičemž je nutno uvažovat pouze kladné sčítance pro výtlač a záporné sčítance pro sání.

S uvažováním e/R je dán okamžitý průtok

$$Q = \sum_{i=0}^{z-1} v_i \cdot S = e \cdot \omega S \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right) + \frac{e \cdot \sin \left[2 \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right) \right]}{2 \cdot \sqrt{R^2 - e^2 \cdot \sin^2 \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right)}} \right] \quad (22)$$

Průměrný průtok Q_s je roven

$$Q_s = V_0 \cdot n = 2e \cdot S \cdot z \cdot n = \frac{e \cdot S \cdot z}{\pi} \cdot \omega \quad (23)$$

Definujeme nyní nerovnoměrnost průtoku poměrem

$$q = \left| \frac{Q - Q_s}{Q_s} \right| = \left| \frac{Q}{Q_s} - 1 \right| = \left| \frac{\pi}{z} \sum_{i=0}^{z-1} \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right) + \frac{e}{R} \cdot \frac{\sin 2 \left(\omega t - \frac{2\pi \cdot i}{z} \right)}{2} \right] - 1 \right| \quad (24)$$

Veličina q závisí na poměru e/R , na počtu pístů z a na úhlu ωt . Nás především bude zajímat maximální hodnota q_{max} v závislosti na počtu pístů z .

Z tab. 2.2.1 můžeme vidět nerovnoměrnost průtoku pro sudý počet a z tab. 2.2.2 pro lichý počet pístů.

Tab. 2.2.1 Výsledky nerovnoměrnosti průtoku pro sudý počet pístů

i	4	6	8	10	12
q_{max}	0,214601837	0,093100318	0,051940551	0,033117201	0,022951383

Tab. 2.2.2 Výsledky nerovnoměrnosti průtoku pro lichý počet pístů

i	3	5	7	9	11
q_{max}	0,09334972	0,03317997	0,016871379	0,010192064	0,006818037

Z porovnání obou tabulek plyne, že pro rovnoměrnost průtoku je příznivější lichý počet než nejbližší vyšší sudý počet pístů. Z tohoto důvodu se pístové hydrogenerátory z velké většiny vyrábí s lichým počtem pístů.

Tabulku vypočítaných hodnot podle předchozích charakteristik pro 7 pístů můžeme vidět v tab. 2.2.3, kde φ je poloha jednotlivého pístu (úhel natočení pístu), v je rychlost pístu v dané poloze dle rovnice (19) pro zanedbané e/R nebo podle rovnice (20) pro nezanedbané e/R . Q je okamžitý průtok jednoho pístku v určité poloze.

Výpočty jsou provedeny pro tyto zadané hodnoty:

Otáčky $n = 24 \text{ s}^{-1}$

Průměr pístu $d = 16 \text{ mm}$

Excentricita $e = 5,5 \text{ mm}$

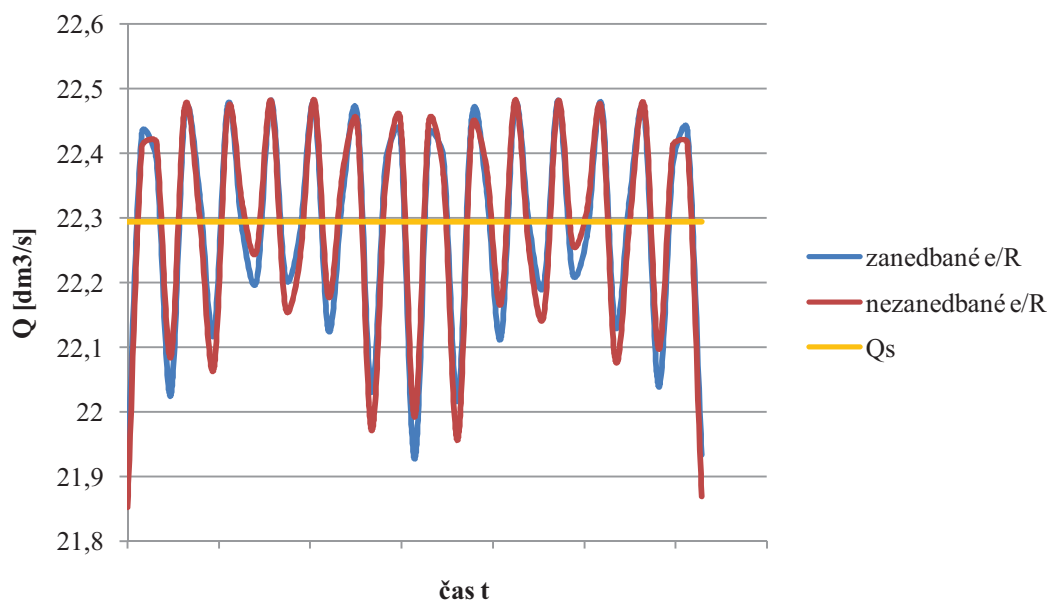
Poloměr oběžné dráhy $R = 0,1 \text{ m}$

Tab. 2.2.3 Výsledné hodnoty rychlosti, průtoku a nerovnoměrnosti průtoku pro 7 pístů

Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Q_s	q
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	
0	0	0	0	0	22,29375
0,897598	0,648658116	7,825227159	0,632959497	7,635843476	0,01687
1,795196	0,808487201	9,75335981	0,755624189	9,11563546	
2,692794	0,359676376	4,339033571	0,324282469	3,912051542	
3,590392	-0,359676376	-4,33903357	-0,324282469	-3,91205154	
4,48799	-0,808487201	-9,75335981	-0,764481461	-9,11563546	
5,385587	-0,648658116	-7,82522716	-0,632959497	-7,63584348	
$\sum Q > 0$		21,9176205	$\sum Q > 0$	21,8520458	

Pro různé počty pístů jsou zobrazeny tabulky v příloze.

Průběh průtoku v závislosti na čase je vyobrazen na obr. 2.2.16, kde můžeme vidět průběh průtoku na výtlaku za jednu otáčku rotoru hydrogenerátoru.



Obr. 2.2.16: Průběh průtoku na výtlaku za dobu jedné otáčky pro 7 pístů



Obr. 2.2.17: Velikost průtoku jednoho pístu v závislosti na natočení

Obr. 2.2.17 nám zobrazuje průběh průtoku za jednu otáčku u jednoho pístu, s uvažováním a zanedbáním e/R . Kde kladná půlvlna zobrazuje výtlak a záporná sání. Grafy se téměř kryjí, z toho důvodu se tyto malé odchylky zanedbávají a proto v mnoha případech poměr e/R ve vzorci na průtok neuvažujeme.

Tab. 2.2.4 znázorňuje velikost průtoku pro různé počty pístů s uvážením a zanedbáním e/R . Zde můžeme vidět, že rozdíly těchto průtoků jsou velmi malé, tudíž je můžeme považovat za zanedbatelné.

Tab. 2.2.4 Velikosti průtoků pro různý počet pístů

z	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q_1 zanedbané e/R [dm^3/min]	8,662	10,005	15,395	17,329	21,917	24,155	28,371	30,793	34,794	37,34
Q_2 nezanedbané e/R [dm^3/min]	8,426	10,005	15,296	17,329	21,852	24,155	28,321	30,793	34,754	37,34
Rozdíl Q_1 a Q_2 [%]	2,802	0	0,646	0	0,300	0	0,175	0	0,115	0

3 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se nám snažila na začátku nastínit problematiku týkající se hydrogenerátorů jako celku, kde jsme se seznámili se základními vztahy pro výpočet a charakteristikami. Dále jsou zde popsány základní rozdělení hydrogenerátorů podle jejich konstrukce, u takto rozdělených typů se snažíme vytvořit představu jejich činnosti, využití, či výhody a nevýhody jednotlivých typů.

Hlavním úkolem této práce bylo se zaměřit na radiální pístový hydrogenerátor. V této části je popsán princip chodu radiálního pístového hydrogenerátoru a zobrazeno několik možných konstrukčních koncepcí tohoto typu, kde jsme se zaměřili na radiální pístový hydrogenerátor s písty vedenými v rotoru. U tohoto typu hydrogenerátoru jsme se podle zadání zabývali velikostí nerovnoměrnosti průtoku v závislosti na počtu pístů, dále pak rozdílem velikosti průtoku pro zanedbání a uvážení poměru e/R ve vztahu pro výpočet průtoku hydrogenerátoru. Po provedení výpočtu jsme došli k výsledku, že nerovnoměrnost průtoku pro lichý počet pístů je menší jak pro sudý, z toho důvodu se většinou vyrábí hydrogenerátory s lichým počtem pístů. V dalším úkolu jsme sledovali rozdíl průtoku pro zanedbání či uvážení e/R ve výpočtu pro průtok. Došli jsme k výsledku, že rozdíl velikostí průtoku je velmi malý a tudíž zanedbatelný, proto lze u výpočtu průtoku těchto hydrogenerátorů poměr e/R zanedbat. Dochází tak ale k určité chybě, která se sice promítá do celkové nepřesnosti návrhu, ale může být zohledněna např. při volbě objemové účinnosti. Podle obecných vztahů je dána základní objemová účinnost hydrogenerátoru, ale musíme však uvažovat i chyby ve výpočtu způsobené zaokrouhlováním a zanedbáváním různých veličin, které jsou pro každé hydrogenerátory odlišné a musí se k této základní účinnosti přičítat.

Každý hydrogenerátor má své klady a zápory, avšak ke kladům radiálního pístového hydrogenerátoru patří především dosáhnutí vysokých provozních tlaků, plynulá změna průtoku změnou excentricity a velmi dobrá sací schopnost. Od tohoto typu hydrogenerátoru se dříve opustilo z důvodů složité konstrukce, ale vlivem vývoje techniky se tyto hydrogenerátory vrací zpět v dokonalejším provedení, mají svá důležitá postavení a jejich plné využití především v průmyslu. Domnívám se, že vývoj hydrogenerátorů však nekončí a jejich zdokonalování bude probíhat i nadále, neboť patří mezi jedny z nejpoužívanějších strojů současnosti zejména ve strojním průmyslu.

LITERATURA

- [1] PACIGA, Alexander – IVANTYŠYN, Jaroslav. *Tekutínové mechanismy*. Bratislava; Praha: ALFA/SNTL, 1985. 288 s. ISBN 63-558-85.
- [2] PIVOŇKA, Josef; *Tekutínové mechanismy*, 1. vydání Praha: SNTL, 1987. 624 s. ISBN 04-225-87
- [3] PROKEŠ, Josef – VOSTROVSKÝ, Jiří. *Hydraulické a pneumatické mechanismy*. 1. vydání Praha: SNTL, 1988. 276 s. ISBN 04-215-88
- [4] PEŇÁZ, Václav – BENŽA, Dušan. *Tekutínové mechanismy*. 1. vydání Brno: VUT Brno, 1990. 211 s. ISBN 80-214-0082-X.
- [5] *Wikipedia – Zubové čerpadlo* [online]. 2006, 20.6. - [cit. 5. květen 2012]. Dostupné na www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zubové_čerpadlo>
- [6] *Jihostroj a.s.* [online]. 2007 – [cit. 8. květen 2012]. Dostupné na www: <<http://www.jihostroj.com/cz/hydraulika/zubova-hydraulicka-cerpadla-a-motory/>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

Značka	Veličina	Jednotka
Q_h	Průtok	[dm ³ /min]
V_0	Geometrický objem hydrogenerátoru	[m ³]
n	Otáčky	[s ⁻¹]
m	Modul ozubení	[-]
z	Počet zubů ozubených kol	[-]
M_{th}	Teoretický kroutící moment	[Nm]
M_z	Ztrátový moment	[Nm]
P_{th}	Teoretický výkon	[kW]
Δp	Tlaková difference před a za hydrogenerátorem	[Pa]
ω	Úhlová rychlost	[Rad/s]
Q_{th}	Teoretický průtok	[dm ³ /min]
F_{th}	Teoretická síla	[N]
Q_z	Ztrátový průtok	[dm ³ /min]
η_Q	Průtoková účinnost	[%]
η_p	Tlaková účinnost	[%]
η	Celková účinnost	[%]
P	Výkon	[kW]
φ	Úhel pootočení hřídele	[Rad]
e	Excentricita rotoru	[mm]
R	Poloměr oběžné na statoru	[mm]
h	Zdvih pístu	[mm]
t	čas	[s]
S	Plocha pístu	[mm ²]
q	Nerovnoměrnost průtoku	[-]

SEZNAM PŘÍLOH

A	Tabulky vypočítaných hodnot	28
A.1	Tabulka vypočítaných hodnot pro 3 písky	28
A.2	Tabulka vypočítaných hodnot pro 4 písky	28
A.3	Tabulka vypočítaných hodnot pro 5 písků	28
A.4	Tabulka vypočítaných hodnot pro 6 písků	29
A.5	Tabulka vypočítaných hodnot pro 8 písků	29
A.6	Tabulka vypočítaných hodnot pro 9 písků	30
A.7	Tabulka vypočítaných hodnot pro 10 písků	30
A.8	Tabulka vypočítaných hodnot pro 11 písků	31
A.9	Tabulka vypočítaných hodnot pro 12 písků	31

A TABULKY VYPOČÍTANÝCH HODNOT

A.1 Tabulka vypočítaných hodnot pro 3 píсты

	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R			
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	Q_s [dm^3/min]	q
0	0	0	0	0	9,554462	0,09333
2,0943951	0,71806703	8,662556513	0,698489828	8,426382773		
4,1887902	-0,718067	-8,662556513	-0,69848983	-8,426382773		
	$\Sigma Q > 0$	8,662556513	$\Sigma Q > 0$	8,426382773		

A.2 Tabulka vypočítaných hodnot pro 4 píсты

	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R			
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	Q_s [dm^3/min]	q
0	0	0	0	0	12,73928	0,2146
1,570796	0,829380461	10,00541016	0,829380461	10,00541016		
3,141593	1,01556E-16	1,22514E-15	9,60228E-17	1,15839E-15		
4,712389	-0,82938046	-10,0054102	-0,829380461	-10,00541016		
	$\Sigma Q > 0$	10,00541016	$\Sigma Q > 0$	10,00541016		

A.3 Tabulka vypočítaných hodnot pro 5 pístů

	Zanedbané R/e		Nezanedbané R/e			
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	v [m/s]	Q [dm^3/min]	Q_s [dm^3/min]	q
0	0	0	0	0	15,92410	0,03317
1,256637061	0,78892175	9,517327813	0,802212254	9,677660634		
2,513274123	0,48728069	5,878415713	0,465794598	5,619213643		
3,769911184	-0,4872807	-5,87841571	-0,4657946	-5,61921364		
5,026548246	-0,7889218	-9,51732781	-0,80221225	-9,67766063		
	$\Sigma Q > 0$	15,39574353	$\Sigma Q > 0$	15,29687428		

A.4 Tabulka vypočítaných hodnot pro 6 pístů

φ [rad]	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Q_s [dm ³ /min]	q
	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	19,10893	0,0931
1,047198	0,7184620	8,66732223	0,738039268	8,903495971		
2,094395	0,7180670	8,66255651	0,698489828	8,426382773		
3,141593	1,0155E-16	1,22514E-15	9,60228E-17	1,15839E-15		
4,18879	-0,7180670	-8,66255651	-0,698489828	-8,42638277		
5,235988	-0,7184620	-8,66732223	-0,738039268	-8,90349597		
$\Sigma Q > 0$		17,32987874	$\Sigma Q > 0$	17,32987874		

A.5 Tabulka vypočítaných hodnot pro 8 pístů

φ [rad]	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Q_s [dm ³ /min]	q
	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	25,47856775	0,05194
0,785398	0,58668863	7,07764485	0,60928577	7,350250468		
1,570796	0,82938046	10,0054101	0,82938046	10,00541016		
2,356194	0,58623247	7,07214188	0,56363531	6,799536274		
3,141592	1,0161E-16	1,22581E-15	9,60228E-17	1,15839E-15		
3,926990	-0,5862325	-7,07214188	-0,56363532	-6,799536274		
4,712388	-0,8293805	-10,0054101	-0,82938046	-10,00541016		
5,497787	-0,5866886	-7,07764485	-0,60928578	-7,350250468		
$\Sigma Q > 0$		24,1551969	$\Sigma Q > 0$	24,1551969		

A.6 Tabulka vypočítaných hodnot pro 9 pístů

	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Qs [dm ³ /min]	q
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	28,66339	0,101
0,69813	0,533340098	6,434063366	0,555590992	6,702491825		
1,39626	0,816858316	9,85434656	0,824592559	9,947650269		
2,09439	0,718067025	8,662556513	0,698489828	8,426382773		
2,79252	0,283518217	3,420283194	0,269001554	3,24515829		
3,49065	-0,28351821	-3,42028319	-0,269001554	-3,24515829		
4,1887	-0,71806702	-8,66255651	-0,698489828	-8,426382773		
4,88692	-0,81685831	-9,85434656	-0,824592559	-9,947650269		
5,58505	-0,53334009	-6,43406337	-0,555590992	-6,702491825		
	Σ Q > 0 28,3712496		Σ Q > 0 28,32168316			

A.7 Tabulka vypočítaných hodnot pro 10 pístů

	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Qs [dm ³ /min]	q
φ [rad]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	31,8482096	0,033117
0,62831	0,48771452	5,883649354	0,509200609	6,142851424		
1,25663	0,78892175	9,517327813	0,802212254	9,677660634		
1,88495	0,78865363	9,514093245	0,775363129	9,353760423		
2,51327	0,48728069	5,878415713	0,465794598	5,619213643		
3,14159	1,0156E-16	1,22514E-15	9,60228E-17	1,15839E-15		
3,76991	-0,4872807	-5,87841571	-0,4657946	-5,61921364		
4,39822	-0,7886536	-9,51409324	-0,77536313	-9,35376042		
5,02654	-0,7889218	-9,51732781	-0,80221225	-9,67766063		
5,65486	-0,4877145	-5,88364935	-0,50920061	-6,14285142		
	Σ Q > 0 30,793486		Σ Q > 0 30,7934861			

A.8 Tabulka vypočítaných hodnot pro 11 pístů

φ [rad]	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Q_s [dm ³ /min]	q
	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	35,03303	0,00681
0,5711	0,448604399	5,411835968	0,469152961	5,659727982		
1,1423	0,754603374	9,103320642	0,771689724	9,309445507		
1,7135	0,820874306	9,902794325	0,814503274	9,825936012		
2,2847	0,626578172	7,558860986	0,604208592	7,289000726		
2,8559	0,233540169	2,817362219	0,221331082	2,670075263		
3,4271	-0,23354016	-2,81736222	-0,22133108	-2,67007526		
3,9983	-0,62657817	-7,55886099	-0,60420859	-7,28900072		
4,5695	-0,82087430	-9,90279433	-0,81450327	-9,82593601		
5,1407	-0,75460337	-9,10332064	-0,77168972	-9,30944550		
5,7119	-0,44860439	-5,41183597	-0,46915296	-5,65972798		
	$\sum Q > 0$ 34,79417414		$\sum Q > 0$ 34,75418549			

A.9 Tabulka vypočítaných hodnot pro 12 pístů

φ [rad]	Zanedbané e/R		Nezanedbané e/R		Q_s [dm ³ /min]	q
	v [m/s]	Q [dm ³ /min]	v [m/s]	Q [dm ³ /min]		
0	0	0	0	0	37,340699	0,02295
0,52359	0,41488775	5,005087937	0,434449978	5,241081065		
1,04719	0,71846207	8,66732223	0,738039268	8,903495971		
1,57079	0,82938046	10,00541016	0,829380461	10,00541016		
2,09439	0,71806703	8,662556513	0,698489828	8,426382773		
2,61799	0,41449271	5,00032222	0,394930482	4,764329093		
3,14159	1,0156E-16	1,22514E-15	9,60228E-17	1,15839E-15		
3,66519	-0,4144927	-5,00032222	-0,39493048	-4,76432909		
4,18879	-0,718067	-8,66255651	-0,69848983	-8,42638277		
4,7123	-0,8293805	-10,0054101	-0,82938046	-10,0054101		
5,23598	-0,7184621	-8,66732223	-0,73803927	-8,90349597		
5,75958	-0,4148878	-5,00508793	-0,43444251	-5,24099091		
	$\sum Q > 0$ 37,3406990		$\sum Q > 0$ 37,34069906			

